

Linee guida per l'utilizzo dei dati interferometrici del geoportale Regione Toscana

Manuale d'uso

Firenze, 29 settembre 2018

Responsabili del progetto

Prof. Nicola CASAGLI
Università degli Studi di Firenze – Dipartimento di Scienze della Terra

Ing. Giovanni MASSINI
Direttore della Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile della Regione Toscana

Dott. Lorenzo BOTTAI
Consorzio LaMMA (Laboratorio di Monitoraggio e Modellistica Ambientale per lo sviluppo sostenibile)

Gruppo di lavoro

Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze

Dott.ssa Silvia BIANCHINI
Dott. Matteo DEL SOLDATO
Dott. Roberto MONTALTI
Dott. Federico RASPINI
Dott. Lorenzo SOLARI

Regione Toscana

Dott.ssa. Marianna BIGIARINI
Dott.ssa Vania PELLEGRINESCHI

Consorzio LaMMA

Dott. Bernardo GOZZINI
Dott. Riccardo MARI

TAVOLA DEI CONTENUTI

1	INTRODUZIONE.....	6
2	GENERALITÀ SULL' INTERFEROMETRIA RADAR SATELLITARE.....	6
3	LE TECNICHE MULTI-INTERFEROMETRICHE.....	10
4	I DATI MULTI-INTERFEROMETRICI NEL GEOPORTALE REGIONE TOSCANA.....	16
5	INTERPRETAZIONE DEI PRODOTTI MULTI-INTERFEROMETRICI.....	18
6	SUGGERIMENTI SULL'UTILIZZO DEI DATI INTERFEROMETRICI.....	21
6.1	CAMPI DI APPLICAZIONE.....	21
6.2	LIMITI DELLA TECNICA INTERFEROMETRICA.....	21
6.3	PRATICHE DA EVITARE.....	22
7	Bibliografia di riferimento.....	24

1 Introduzione

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito dell'accordo "*Attività di monitoraggio del rischio idrogeologico nel territorio della regione Toscana*" stipulato il 06 dicembre 2017, ai sensi dell'art. 15 della legge 7 agosto 1990, n. 241, e dell'art. 6 della legge 24 febbraio 1992, n. 225, tra la Regione Toscana, il Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri e il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze.

L'obiettivo principale delle attività è quello di fornire informazioni utili alla formulazione di un quadro sinottico dei fenomeni di deformazione del suolo sull'intero territorio regionale, a supporto delle Regioni, dei Comuni e degli Enti Territoriali coinvolti nelle attività per la difesa del territorio e di gestione dei rischi. A tal scopo è stata generata una banca dati rappresentativa del territorio regionale contenente le misure dei movimenti del terreno ottenute mediante interferometria SAR (*Synthetic Aperture Radar*) satellitare e resa fruibile attraverso il Geoportale pubblico del Consorzio LaMMA.

A complemento di tali informazioni, distribuite su tutto il territorio regionale ad eccezione delle isole minori, è stato redatto il presente manuale d'uso che ha lo scopo di fornire a tutti gli enti utilizzatori uno strumento di supporto all'interpretazione e all'utilizzo dei dati interferometrici satellitari, in relazione ai fenomeni di dissesto osservati.

Il presente manuale d'uso illustra sinteticamente la metodologia di analisi del dato SAR satellitare, elaborato mediante tecniche multi-interferometriche al fine di mappare e caratterizzare i movimenti del terreno. In aggiunta, saranno illustrati alcuni consigli pratici per l'interpretazione dei dati interferometrici che dovranno essere seguiti dagli utilizzatori del geoportale per evitare un utilizzo improprio o scorretto dei suddetti prodotti.

Il *dataset* oggetto dell'analisi è quello ottenuto elaborando immagini acquisite dalla costellazione di satelliti Sentinel-1 dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), tramite la tecnica multi-interferogramma *PSInSAR SqueeSAR* (*Permanent Scatterers Interferometric Aperture Radar*).

Infine, verranno presentati vantaggi e limiti della tecnica interferometrica e i suoi campi di applicazione preferenziale.

In calce al documento sono elencati alcuni articoli scientifici liberamente consultabili in italiano o in inglese, utili per approfondire l'argomento.

2 Generalità sull' interferometria radar satellitare

I sistemi *radar* (acronimo di *radio detecting and ranging*) satellitari sono sensori di tipo attivo, ossia inviano un segnale che viene riflesso dalla superficie terrestre e ricevuto dal sensore. Rispetto ai più noti sistemi ottici operano con continuità, potendo acquisire dati in presenza di copertura nuvolosa e sia di giorno che di notte.

Il principio di funzionamento è il medesimo per tutti i sistemi *radar*: un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica (con determinata lunghezza d'onda e frequenza) che incide su eventuali oggetti subendo un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, *scattering*). Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, equipaggiata anche per la ricezione, dove vengono misurate le sue caratteristiche. Il dispositivo è in grado di individuare il bersaglio elettromagnetico (*detection*) e, misurando lo sfasamento tra il segnale emesso e quello ricevuto, valutare la distanza (*ranging*) a cui il bersaglio è posizionato, localizzandolo in modo preciso lungo la direzione di puntamento dell'antenna (direzione di *range*). La direttività dell'antenna utilizzata per trasmettere e ricevere il segnale radar, e cioè la selettività nell'illuminazione dello spazio circostante, consente di localizzare l'oggetto anche lungo l'altra dimensione (detta di *azimuth*, ovvero la direzione parallela all'orbita del satellite).

La direzione della congiungente sensore-bersaglio (perpendicolare all'orbita ed inclinata di un angolo θ - detto *off-nadir* - rispetto alla verticale) è detta *slant range* (o più semplicemente *range*) oppure LOS (*Line Of Sight*, linea di vista del satellite).

Le immagini *radar* contengono due tipi di informazione: la fase, indice della distanza sensore bersaglio e l'ampiezza, ossia l'ampiezza del segnale riflesso dal terreno. Ogni cella di un'immagine contiene entrambe le quantità. L'ampiezza individua la parte di campo elettromagnetico incidente riflessa verso il sensore e può essere utilizzata per valutare il cambiamento delle superfici nel tempo (ad esempio la variazione di umidità nei terreni agricoli). La fase rappresenta l'informazione più importante ai fini delle applicazioni interferometriche e viene utilizzata per ricavare, attraverso algoritmi specifici, gli spostamenti del terreno.

I satelliti *radar* permettono di misurare spostamenti superficiali del terreno con precisione millimetrica grazie all'impiego di particolari tecniche di elaborazione dei dati dette "interferometriche". Tra le più recenti e sofisticate, la tecnica *SqueeSAR* consente di individuare dei particolari bersagli al suolo per i quali è possibile stimare il loro spostamento nel tempo. *SqueeSAR* (Ferretti et al., 2011) rappresenta l'evoluzione della tecnica *PSInSAR* (Ferretti et al., 2001; Colesanti et al., 2003), sviluppata e brevettata nel 1999 dal Politecnico di Milano e concessa in licenza esclusiva nel 2000 a Tele-Rilevamento Europa (TRE) S.r.l., *spin-off* del Politecnico. Le tecniche *PSInSAR* e *SqueeSAR* rappresentano gli strumenti più efficaci per il monitoraggio da remoto, con accuratezza millimetrica, dei fenomeni di deformazione della superficie terrestre.

L'interferometria satellitare si basa sulla misura delle variazioni di fase tra due acquisizioni del satellite nello stesso punto. In Figura 1 viene illustrato in maniera schematica questo principio. Il satellite passa su di un punto acquisendo un segnale la cui fase è dipendente dalla distanza sensore-bersaglio in quel dato momento. In caso di movimento del terreno (in questo caso un abbassamento tettonico) la distanza sensore bersaglio aumenta e di conseguenza la fase subisce una variazione misurabile. Questo tipo di elaborazione viene comunemente chiamata interferometria differenziale (acronimo DInSAR).

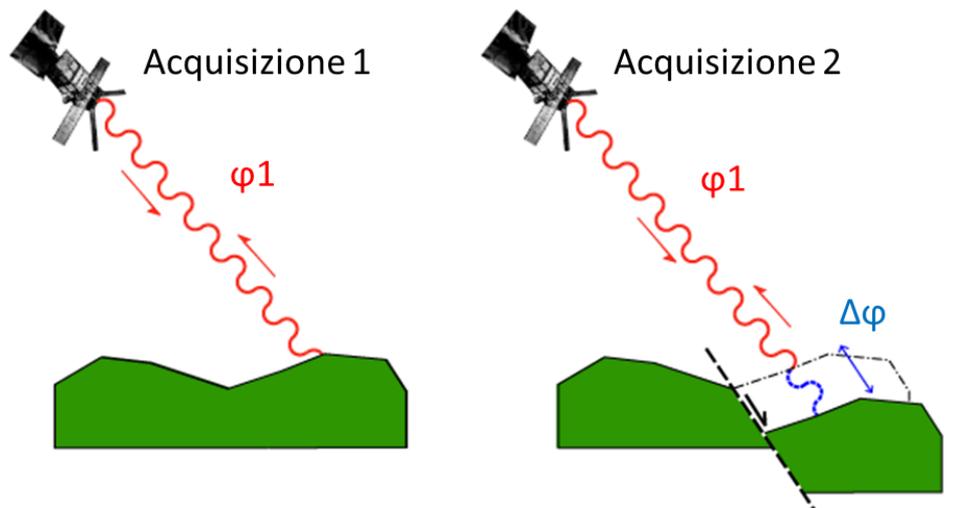


Figura 1 – Principio base dell'interferometria. A sinistra la prima acquisizione nella quale viene misurata la distanza tra il punto a terra e il sensore (fase φ_1). A destra la variazione della distanza sensore-bersaglio a causa di un terremoto; la fase è pari a $\varphi_1 + \Delta\varphi$ (modificata a partire da http://comet.earth.ox.ac.uk/for_schools_radar4.html).

L'interferometria differenziale si basa sulla misura di fase tra due diverse acquisizioni sulla stessa area. L'obiettivo della tecnica interferometrica differenziale è quello di isolare gli effettivi contributi di fase dovuti al movimento del bersaglio e non imputabili a disturbi atmosferici o rumore, ovvero di stimare accuratamente la differenza di fase ($\Delta\varphi$) dell'onda elettromagnetica trasmessa in due successive acquisizioni e retrodiffusa dal bersaglio a terra. La tecnica DInSAR permette di valutare le differenze, in termini di spostamento del terreno, intercorse tra due immagini. Il prodotto dell'elaborazione viene chiamato interferogramma.

In Figura 2 è mostrato un esempio di interferogramma derivato in seguito al terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009. L'interferogramma è caratterizzato da quelle che vengono definite frange interferometriche che rappresentano un ciclo di variazione della fase interferometrica: maggiore è il movimento intercorso tra due immagini, più fitte e numerose saranno le frange. Ognuna di esse equivale ad uno spostamento di 2.8 cm.

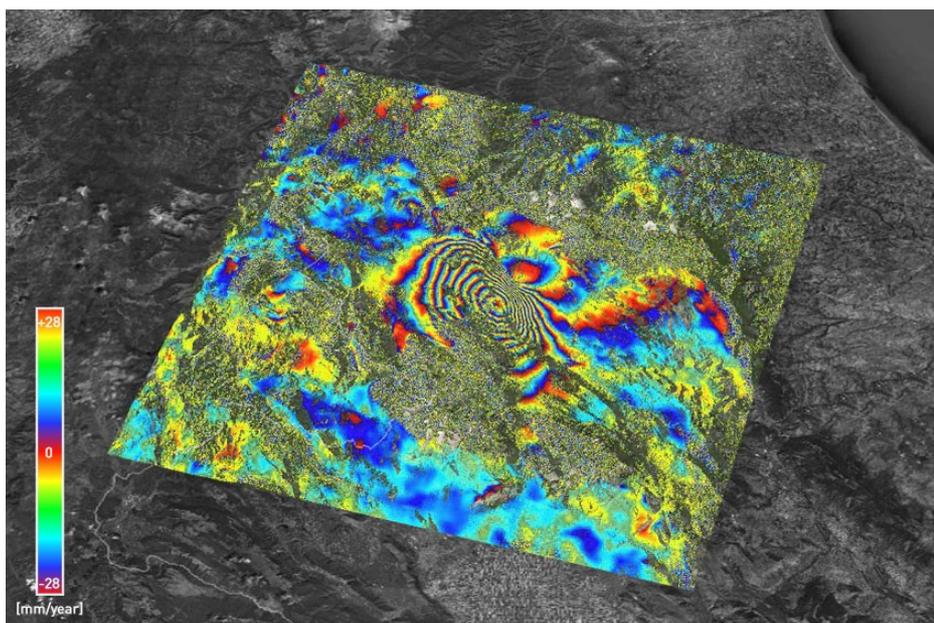


Figura 2 – Interferogramma relativo al sisma de L'Aquila del 6 aprile 2009. Ogni frangia equivale ad uno spostamento del terreno di 2.8 cm (da <https://site.tre-altamira.com/tag/earthquake/>).

Diversi effetti riducono (o addirittura compromettono) la qualità dei risultati ottenuti con l'analisi DInSAR. In primo luogo, i fenomeni di decorrelazione temporale. Questi sono causati dalla variabilità delle proprietà elettromagnetiche (riflettività) dei bersagli *radar* tra i diversi giorni di acquisizione del dato, indicati dal parametro *baseline* temporale. Le zone coperte da vegetazione, facilmente influenzabili dal vento e di diverso aspetto a seconda della stagione, sono spesso fonte di decorrelazione, mentre i centri urbani e le rocce esposte rimangono maggiormente stabili nel tempo (cambiamenti possono essere causati anche da altri eventi atmosferici quali pioggia o neve).

La qualità dell'interferogramma dipende anche dalla distanza tra le due orbite effettivamente percorse dal sensore durante l'acquisizione delle due immagini (detta *baseline* normale o geometrica). Si può dimostrare che maggiore è il valore assoluto della *baseline*, minore è la banda comune tra i due segnali e quindi minore è il rapporto segnale-rumore relativo all'interferogramma da esse generato. Questo disturbo è denominato decorrelazione geometrica.

L'interpretazione dei dati interferometrici può essere ulteriormente complicata dalla variazione delle condizioni atmosferiche durante le due acquisizioni che si possono tradurre in un ulteriore termine di fase, difficile da discriminare dal contributo relativo al movimento.

3 Le tecniche multi-interferometriche

Lo sviluppo, a partire dai primi anni 2000, delle tecniche multi-interferometriche ha permesso di superare i limiti intrinseci dell'interferometria differenziale, poiché consentono di contenere i fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica e stimare i contributi di fase legati ai cambiamenti subiti dall'atmosfera tra le diverse acquisizioni.

Queste tecniche si basano su analisi di tipo multi-interferogramma o multi-immagine, cioè utilizzano una lunga serie di immagini *radar* relative a una stessa area, all'interno delle quali vengono identificati alcuni bersagli che vengono utilizzati per la misura degli spostamenti. Grazie alla disponibilità di grandi archivi di dati acquisiti dalle agenzie spaziali, le tecniche multi-interferometriche permettono di ottenere risultati migliori di quelli ricavabili con analisi interferometriche convenzionali, sia per la qualità delle misure di deformazione ottenute (precisione millimetrica), sia per la capacità di seguire la loro evoluzione temporale. Infatti, mentre l'interferometria differenziale campiona il fenomeno di deformazione in esame tramite lo studio di due acquisizioni (la *master* M, e la *slave* S), stimando soltanto la deformazione cumulata avvenuta tra le due acquisizioni, l'analisi multi-interferogramma è capace di fornire la descrizione completa dell'evoluzione temporale delle deformazioni. Ovviamente, questa capacità è limitata dal numero e dalla distribuzione temporale delle acquisizioni disponibili.

Le tecniche multi-interferometriche si basano sulla definizione in ogni immagine *radar* dei così detti riflettori permanenti (*Permanent Scatterers* in inglese), elementi già presenti al suolo che mantengono la stessa "firma elettromagnetica" in tutte le immagini al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche, preservando quindi l'informazione di fase nel tempo. Questi punti, essendo praticamente immuni da effetti decorrelazione temporale e spaziale, consentono di seguire gli spostamenti intercorsi tra multiple immagini *radar*.

Tra le più recenti e sofisticate, la tecnica *SqueeSAR* consente di individuare dei particolari bersagli al suolo per i quali è possibile stimare il loro spostamento nel tempo. *SqueeSAR* (Ferretti et al., 2011) rappresenta l'evoluzione della tecnica *PSInSAR* (Ferretti et al., 2000; 2001; Colesanti et al., 2003), sviluppata e brevettata nel 1999 dal Politecnico di Milano e concessa in licenza esclusiva nel 2000 a Tele-Rilevamento Europa (TRE) S.r.l., *spin-off* del Politecnico. Le tecniche *PSInSAR* e *SqueeSAR* rappresentano gli strumenti più efficaci per il monitoraggio da remoto, con accuratezza millimetrica, dei fenomeni di deformazione della superficie terrestre.

La tecnica *PSInSAR* rappresenta il capostipite di tutte le tecniche multi-interferogramma, vale a dire di quelle tecniche che impiegano lunghe serie temporali di immagini *radar* satellitari per l'individuazione e la misura di fenomeni deformativi della superficie terrestre.

In particolare, la tecnica si basa sull'osservazione di un piccolo sottoinsieme di bersagli *radar*, denominati diffusori permanenti (*Permanent Scatterers*, PS), che sono praticamente immuni da effetti di decorrelazione temporale e spaziale. Ciò significa che essi mantengono la stessa "firma elettromagnetica" in tutte le immagini *radar* utilizzate, al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche, preservando l'informazione di fase nel tempo. Il segnale di fase è proprio l'elemento che contiene l'informazione relativa alla posizione al suolo e alla distanza del bersaglio dal satellite. Poiché i segnali utilizzati hanno lunghezze d'onda centimetriche (microonde), spostamenti anche di pochi millimetri inducono degli sfasamenti tra un'onda e la successiva che possono essere rilevati (Figura 3). I PS corrispondono generalmente ad elementi già presenti al suolo, quali strutture di origine antropica (edifici, monumenti, strade, linee ferroviarie, antenne, tralicci, elementi metallici, etc.), oppure elementi naturali (affioramenti rocciosi, accumuli di detrito): ovvero a tutti quegli elementi già presenti al suolo, le cui caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche e atmosferiche.

Al contrario, la risposta elettromagnetica della vegetazione, il cui aspetto muta di continuo, cambia anche per brevi intervalli temporali. La Figura 3 mostra una rappresentazione schematica della base teorica della tecnica interferometrica, di un PS e dei disturbi presenti nelle acquisizioni *radar* (disturbi atmosferici,

variazione della componente di riflettività che dà luogo a decorrelazione temporale, variazione della *baseline* normale che dà luogo a decorrelazione geometrica).

La densità spaziale dei PS risulterà quindi variabile a seconda del sensore utilizzato per l'analisi, dell'uso del suolo e della morfologia del terreno. In generale, i PS raggiungono una densità molto elevata in corrispondenza dei centri urbani e delle aree antropizzate (fino a diverse centinaia di PS/km²), mentre sono pressoché assenti nelle zone vegetate o innevate. In generale, affinché la tecnica risulti applicabile con successo è necessario disporre di un *dataset* di almeno 25-30 immagini *radar*. Maggiore è il numero delle immagini disponibili e l'omogeneità della loro distribuzione temporale, migliori sono i risultati. In dettaglio, mediante l'analisi statistica delle variazioni dei valori di ampiezza e di fase di ciascun *pixel* dell'area di interesse è possibile individuare i riflettori più stabili.

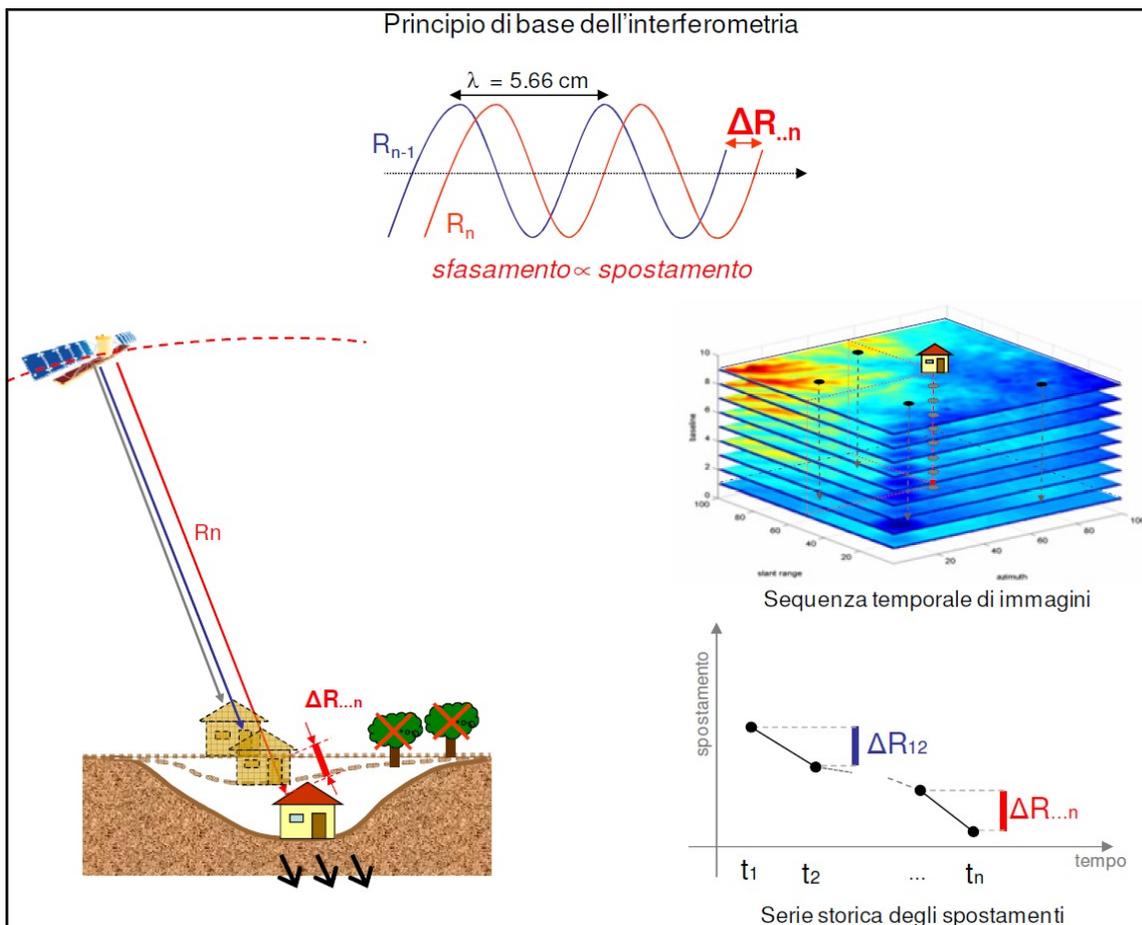


Figura 3 - Principio di funzionamento della tecnica interferometrica, basato sulla misura di variazione di distanze satellite-bersaglio a terra.

Nel 2011 TRE ha sviluppato l'algoritmo *PSInSAR* di seconda generazione, *SqueeSAR*, il quale rappresenta la tecnica *InSAR* (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) più all'avanguardia per la misura degli spostamenti superficiali, in grado di estrarre informazione di movimento in aree dove altre tecniche non sono ancora in grado di farlo, e con la più alta densità possibile di punti di misura, aumentando la comprensione generale dei movimenti relativi ad un'area di interesse. La tecnica *SqueeSAR* (Figura 4) rappresenta la soluzione più avanzata per il monitoraggio non solo delle aree urbane ma anche di quelle extra-urbane, dove la densità delle misure PS può talvolta risultare non soddisfacente. L'innovazione consiste nell'aver individuato una nuova famiglia di "bersagli" monitorabili da satellite, i cosiddetti *Distributed Scatterers* o DS, che si vanno ad aggiungere ai PS.

I dati, in un'immagine *radar*, provengono da bersagli di varia natura a terra. È possibile classificare i *pixel* dell'immagine in due famiglie di bersagli: i bersagli puntiformi, che caratterizzano un solo *pixel*, o al più pochi altri *pixel* ad esso connessi, e i bersagli distribuiti, che caratterizzano tutto un gruppo di *pixel*, e che generano caratteristiche pressoché identiche del segnale *radar* riflesso. I primi rappresentano i PS, mentre i secondi costituiscono la nuova famiglia dei DS. Sono DS le aree detritiche, i campi non coltivati, le aree desertiche non sabbiose.

A differenza di un *target* puntiforme, dove l'energia retro-diffusa verso il sensore risulta elevata e concentrata in un'area molto ridotta, l'intensità dell'eco *radar* per un *pixel* appartenente a un DS è solitamente meno forte, perché manca un bersaglio dominante. D'altra parte, l'utilizzo congiunto di tutti i *pixel* appartenenti al DS permette di ridurre il rumore presente nei dati, migliorando in modo significativo la qualità della stima, tanto che le serie temporali di movimento di un DS appaiono meno rumorose.

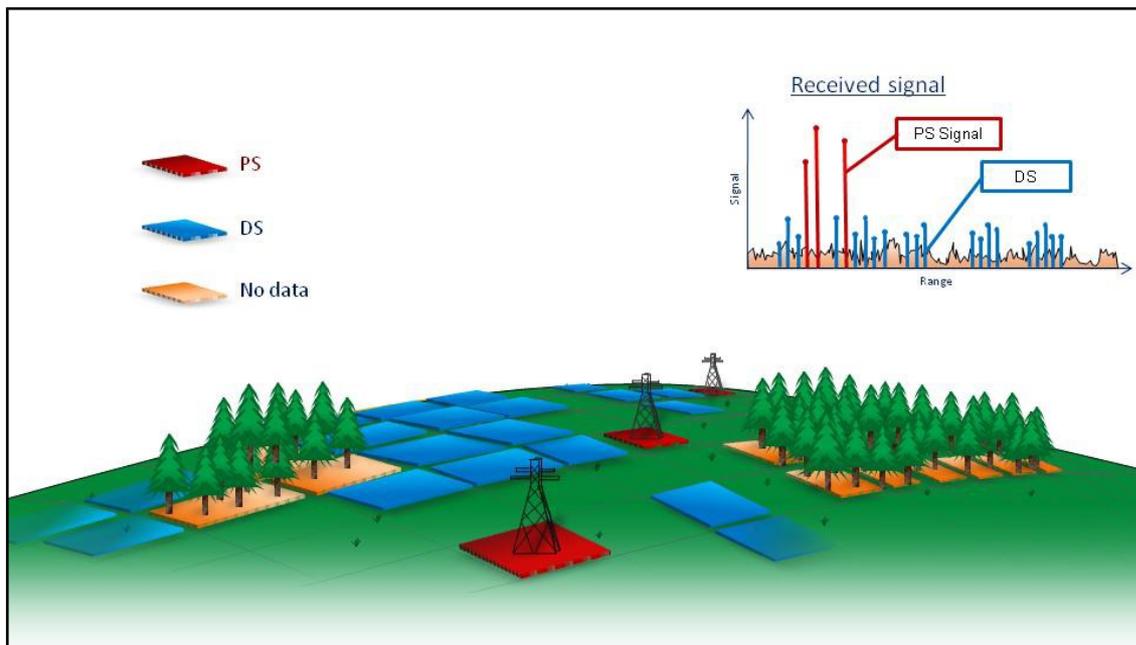


Figura 4 - Differenze tra DS (*Distributed Scatterer*) e PS (*Permanent Scatterer*).

In corrispondenza di ciascun riflettore (PS o DS) individuato è possibile fare una stima del disturbo atmosferico e rimuoverlo, isolando quindi il contributo dovuto alle sole deformazioni del terreno. Più precisamente, una volta stimato il contributo atmosferico, vengono individuate tutte le componenti che costituiscono la fase interferometrica, eliminati i termini spuri e isolato il termine che descrive la variazione di cammino ottico dell'onda elettromagnetica nelle varie acquisizioni, cioè il movimento del "bersaglio" nell'arco temporale tra il primo e l'ultimo dato disponibile.

Per ogni singolo bersaglio (PS o DS) si ricavano la posizione (le sue coordinate geografiche: latitudine, longitudine, quota), il *trend* medio di deformazione (calcolato in mm/anno come l'interpolazione lineare dello spostamento misurato nell'intero periodo di monitoraggio) e l'intera serie temporale degli spostamenti, fornendo un valore di spostamento per ognuna delle acquisizioni disponibili. Tutte le misure sono sempre calcolate lungo la congiungente sensore-bersaglio (linea di vista del sensore, LOS), che è inclinata rispetto alla verticale di un angolo (θ) che varia secondo il satellite utilizzato. Inoltre, tutte le misure sono di tipo differenziale, ottenute dopo avere determinato uno o più punti di riferimento a terra (*reference points*), di coordinate note e supposti fermi (su basi geologiche oppure indicati come tali ad esempio da misure GPS o di livellazione ottica). Inoltre, tutte le informazioni di movimento fornite dai PS sono relative e non assolute, cioè sono riferite temporalmente alla data di acquisizione della immagine *master*, usata come misura "zero" (es.: prima acquisizione disponibile nell'arco temporale analizzato).

La particolare combinazione tra il moto del satellite che orbita intorno alla Terra e il movimento di rotazione della Terra stessa, permette al sensore di rilevare la stessa area geografica secondo due differenti geometrie (Figura 5 e Figura 6):

- in modalità ascendente, quando il satellite percorre l'orbita da S verso N, e illumina l'area da O verso E;
- in modalità discendente, quando il satellite percorre l'orbita da N verso S, e illumina l'area da E verso O.

Come conseguenza delle diverse geometrie di acquisizione si possono registrare deformazioni di segno opposto (positive oppure negative). Per convenzione si hanno segni positivi per spostamenti in avvicinamento lungo la congiungente sensore-bersaglio e segni negativi per allontanamenti rispetto al sensore. Un moto con componente prevalentemente verticale come la subsidenza determina velocità di deformazione simili in entrambe le geometrie sia come intensità che come segno (*i.e.*, in allontanamento rispetto al satellite in entrambe le geometrie). Ugualmente, un fenomeno di sollevamento determina velocità di deformazione simili sia come intensità che come segno (anche se in questo caso si avrà un avvicinamento in entrambe le geometrie). Al contrario, un moto con componente orizzontale non trascurabile (come una frana) determina velocità di deformazioni diverse nelle due geometrie, sia come intensità che come segno: in una geometria si hanno velocità negative (ovvero il sensore registra un allontanamento), nell'altra si hanno velocità positive (ovvero il sensore registra un avvicinamento) (Figura 5).

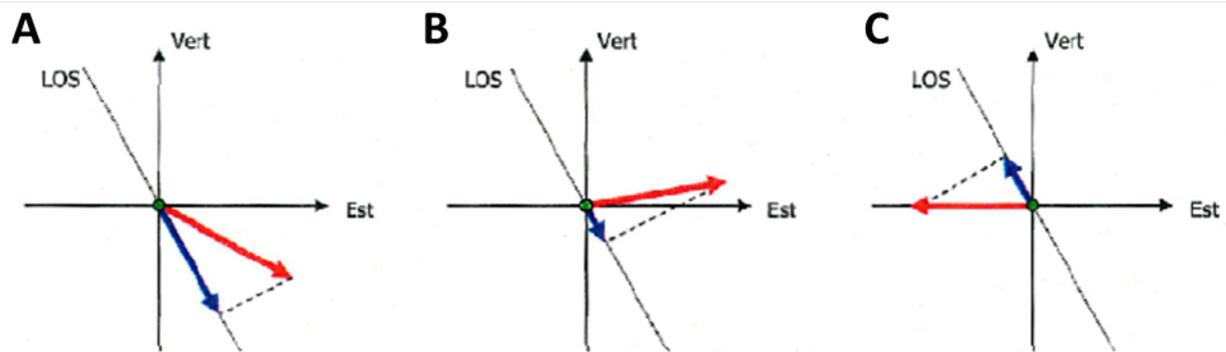


Figura 5 – Variazione della quantità e del segno della componente di deformazione misurata da lungo la LOS (freccia blu) in funzione dell'orientazione della direzione reale del movimento (freccia rossa).

Come detto, l'area al suolo viene rilevata sotto due angoli di vista praticamente speculari (Figura 6). Disponendo di una adeguata disponibilità di punti di misura, dalla combinazione di dati ascendenti con quelli discendenti è possibile risalire all'orientazione del vettore velocità nel piano Est-Verticale e quindi fornire una stima del moto verticale e orizzontale in direzione Est-Ovest. Un eventuale spostamento in direzione puramente orizzontale Nord-Sud non può essere rilevato per ragioni intrinseche alla geometria del sistema (orbita dei satelliti quasi parallela alla direzione Nord-Sud, da cui si discosta per un angolo δ e visione *side-looking*).

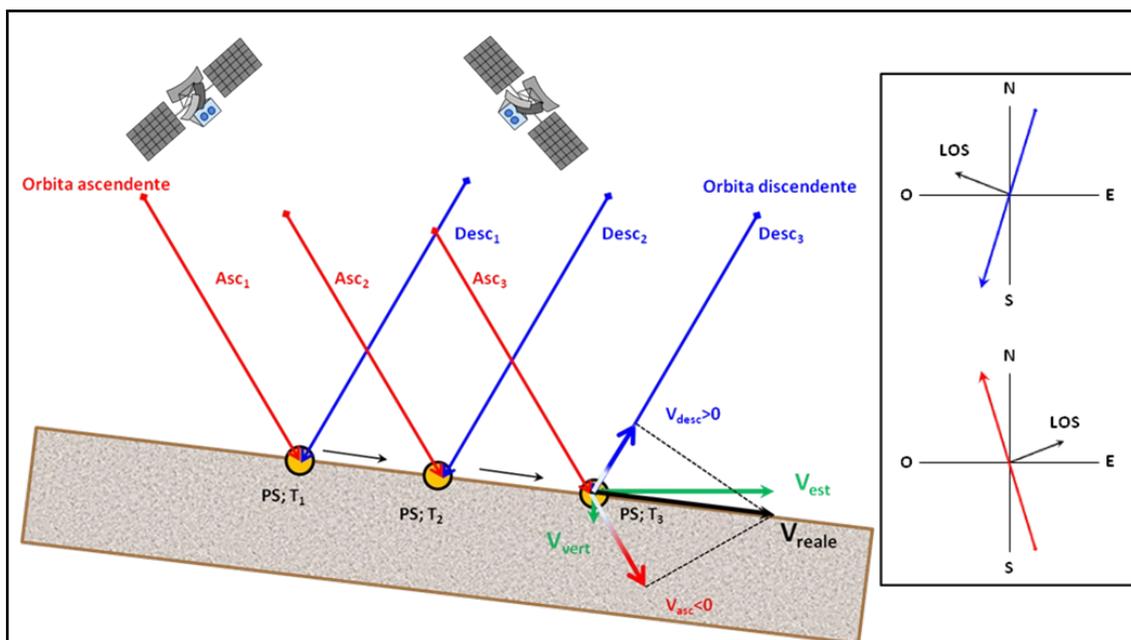


Figura 6 - Scomposizione del moto nelle direzioni verticale e orizzontale (indicate in verde), risultata dalla combinazione delle misure in geometria ascendente e discendente.

Un quadro di insieme delle precisioni ottenibili con un'analisi *SqueeSAR* di immagini SAR in banda C (come quelle acquisite dai satelliti Sentinel-1) è dato nella Tabella 1, nella quale vengono riportati i valori di deviazione *standard* (σ) per la velocità di spostamento media, la misura di deformazione singola (millimetri di spostamento in un certo *intervallo* temporale), coordinate geografiche del punto (Nord, Est, quota). Aspetto quest'ultimo da non sottovalutare, specie se l'obiettivo dell'analisi si riduce a un singolo edificio o una parte di esso.

Parametro	Precisione banda C
Posizione in Nord	± 2 m
Posizione in Est	± 7 m
Quota ellissoidica	$\pm 1,5$ m
Velocità media di spostamento	± 2 mm/anno
Misura di spostamento singola	± 5 mm

Tabella 1 - Tabella riassuntiva relativa alle precisioni ottenibili con sensori in banda C.

L'apparente incongruenza tra la precisione di spostamento (millimetrica) e la precisione di posizionamento (metrica) dei punti a terra dipende dal fatto che lo spostamento è misurato come frazione della lunghezza d'onda, mentre la precisione di posizionamento è di fatto funzione della dimensione del *pixel* dell'immagine a terra (alcuni metri). Inoltre, bisogna considerare che nel caso di PS, il bersaglio *radar* corrisponde all'elemento dominante all'interno del *pixel* e che quindi la dimensione reale del punto monitorato a terra è in genere più piccola della dimensione del *pixel* dell'immagine.

In sintesi, i punti di forza della tecnica *SqueeSAR* rispetto ai tradizionali sistemi di monitoraggio delle deformazioni possono essere così riassunti:

- il contributo all'analisi e allo studio del territorio tramite l'individuazione di aree soggette a movimento e la ricostruzione dell'evoluzione temporale delle deformazioni;
- la possibilità di elaborare un lungo archivio storico di immagini *radar* (dal 1992 ad oggi, grazie agli archivi ESA), da cui la possibilità di indagare i fenomeni di dissesto attivi o riattivati in questo arco

temporale. Questo può rivelarsi un elemento importante soprattutto laddove le tecniche convenzionali richiedono mesi prima di poter dare misure significative, consentendo di recuperare informazioni altrimenti non reperibili con le tradizionali tecniche di monitoraggio. Per una specifica area è pertanto possibile ricostruire, senza necessità di contatto diretto con il terreno e senza l'installazione di strumentazione a terra, l'evoluzione delle deformazioni superficiali degli ultimi quindici - venti anni.

- la possibilità di ottenere misure differenziali con accuratezza millimetrica;
- la possibilità di ricostruire la componente verticale e orizzontale (sul piano E-O e verticale) delle deformazioni, quando si dispone di due geometrie di acquisizione e di una densità di PS sufficientemente elevata;
- la maggiore accuratezza delle misure in direzione verticale rispetto alla tecnica GPS;
- la possibilità di ottenere stime accurate della velocità di spostamento (con accuratezza dell'ordine del millimetro) su una rete di misurazione molto densa (in area urbana fino a circa 200 PS/km²), senza la necessità di contatto diretto con la zona di indagine e senza dover installare strumentazione invasiva e/o apparecchiature al suolo;
- le tecniche interferometriche da satellite possono essere utilizzate come supporto in parallelo a tecniche di monitoraggio tradizionali basate a terra.

È importante sottolineare anche i limiti della tecnica PS, che possono essere riassunti come segue:

- capacità di apprezzare solo deformazioni con velocità non superiori ad alcuni cm/anno. Tenendo conto delle lunghezze d'onda utilizzate e dei tempi di rivisitazione dei sensori, si possono ricavare informazioni solo su movimenti lenti;
- capacità di rilevare deformazioni lungo la direzione della LOS: le misure di spostamento fornite dai dati PS sono perciò una componente di deformazione del vettore reale dello spostamento;
- necessità che l'area oggetto di studio presenti una densità sufficiente di diffusori permanenti (quantomeno lieve urbanizzazione, oppure presenza di rocce esposte) e che non sia interessata da deformazioni prospettiche legate alla topografia del terreno;
- sottostima delle deformazioni in caso di versanti orientati verso Nord o Sud (a causa della traiettoria orbitale del satellite).

Due sono gli elementi di grande rilievo, nell'impiego delle tecniche interferometriche applicate ai dati satellitari per il monitoraggio delle deformazioni del terreno:

1) la vasta disponibilità di dati *radar* su molte aree, e in particolare su tutto il territorio italiano, che permette pertanto di condurre delle analisi storiche, vale a dire delle indagini a ritroso nel passato, di fondamentale importanza per comprendere l'evoluzione di fenomeni già avvenuti, consentendo di recuperare informazioni altrimenti non reperibili con le tradizionali tecniche di monitoraggio basate a terra. Per una specifica area è pertanto possibile ricostruire, senza necessità di contatto diretto con il terreno e senza l'installazione di strumentazione a terra, l'evoluzione delle deformazioni superficiali degli ultimi anni (a partire dal 1992 se si considerano gli archivi dei satelliti ERS dell'ESA).

2) il lancio del satellite Sentinel-1A dell'ESA nell'aprile 2014 ha permesso un flusso continuo di dati *radar* satellitari acquisiti con regolarità, ogni 12 giorni, su vaste aree del pianeta e in particolare sull'Italia. Questo intervallo temporale si è accorciato a 6 giorni da quando anche i dati di Sentinel-1B, lanciato il 25 aprile 2016, sono disponibili. Tale missione opera in modo da acquisire in maniera regolare e sistematica immagini satellitare in modo da costruire archivi consistenti adatti a programmi di analisi a lungo termine. Sentinel-1 offre quindi una nuova opportunità per l'analisi della superficie terrestre e risulta la migliore scelta operativa per attività di studio delle deformazioni del suolo.

4 I dati del geoportale Regione Toscana

I dati interferometrici del geoportale Regione Toscana vengono forniti come *shapefile* puntuale e visualizzati in maniera interattiva all'interno del portale.

I dati PS vengono visualizzati utilizzando una specifica scala colori la quale potrà essere riprodotta dall'utente attraverso un *file* di vestizione consegnato congiuntamente ai dati puntuali. La scala colori è mostrata in Figura 7. I punti di misura sono classificati secondo la velocità media annua di deformazione (espressa in mm/anno) secondo tale convenzione:

- il colore verde corrisponde a quei punti la cui velocità di deformazione è molto bassa, compresa tra -2,0 e +2,0 mm/anno, ovvero all'interno dell'intervallo di sensibilità della tecnica interferometrica e definito sulla base della deviazione standard dei dati utilizzati;
- con i colori da giallo a rosso sono classificati quei punti di misura con velocità di deformazione negativa, che corrisponde a movimenti in allontanamento dal satellite lungo la linea di vista sensore-bersaglio;
- con i colori da azzurro a blu sono classificati quei punti di misura con velocità di deformazione positiva, che corrisponde a movimenti in avvicinamento al satellite lungo la linea di vista sensore-bersaglio.

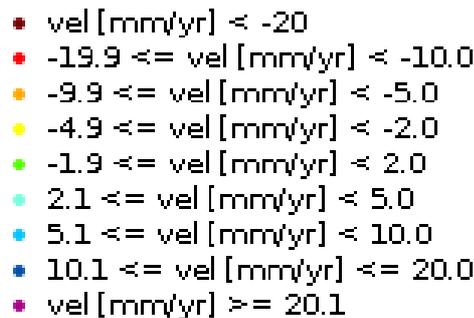


Figura 7 – Scala colori standardizzata per tutti i prodotti interferometrici visualizzati nel geoportale.

I dati sono disponibili in entrambe le orbite di acquisizione del satellite Sentinel-1, ascendente (da Sud a Nord) e discendente (da Nord a Sud). Ogni punto PS sul geoportale è interrogabile dall'utente. La tabella degli attributi associata ad ogni punto contiene diverse informazioni utili al fine dell'interpretazione dei movimenti. Queste informazioni possono essere visualizzate anche in un qualsiasi sistema GIS una volta scaricato il dato dal geoportale. Di seguito sono elencati i campi che contraddistinguono ogni punto:

- CODE, codice univoco di riconoscimento del PS;
- HEIGHT, quota del punto estratta a partire dal modello digitale del terreno usato per elaborare le immagini *radar*;
- EFF_AREA, se uguale a zero il punto è un PS. Se maggiore di zero il punto è un DS, quindi riferito ad un'area e non ad un oggetto puntuale (il valore è in m²);
- VEL, valore di velocità media del punto misurato lungo la LOS del satellite ed espresso in mm/anno;
- V_STDEV, valore di deviazione *standard* della velocità media (espressa in mm/anno);
- H_STDEV, stima dell'errore della stima della quota del PS (espresso in m);
- COHERENCE, indice che misura l'accordo tra i dati ed il modello di spostamento utilizzato in fase di analisi (numero compreso tra 0 e 1, rispettivamente nessuna attinenza ed elevato accordo con il modello). Essa indica la qualità della serie temporale per ogni punto. Se il valore è superiore a 0.75 la serie temporale si considera molto affidabile.

Per ogni punto di misura è possibile visualizzare la serie temporale di deformazione dall'inizio del periodo monitorato fino alla data dell'ultima acquisizione satellitare disponibile (Figura 8).

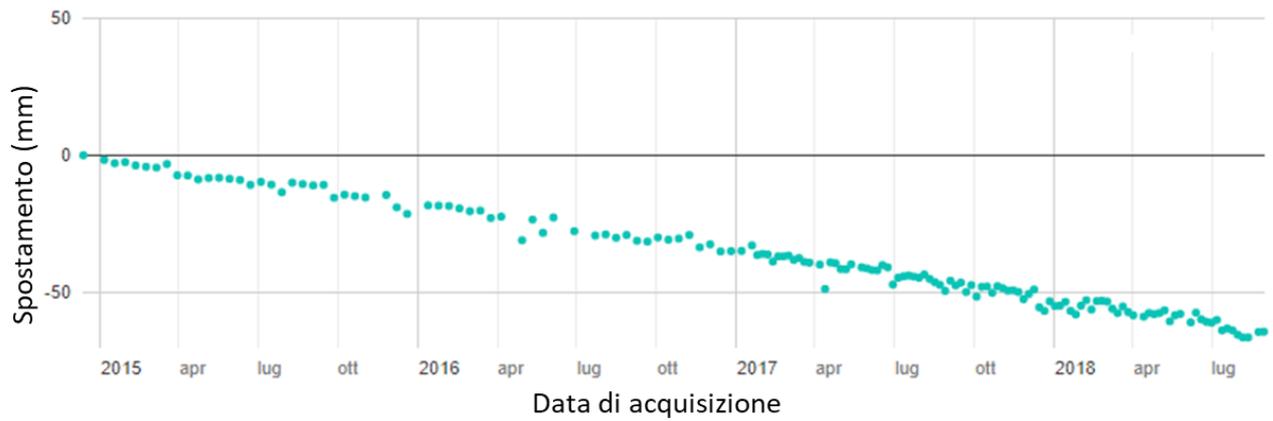


Figura 8 – Esempio di serie temporale di deformazione. In ascissa la data di acquisizione, in ordinata lo spostamento registrato in millimetri.

5 Interpretazione dei prodotti multi-interferometrici

L'interpretazione dei prodotti interferometrici deve avvenire attraverso il confronto e l'integrazione con dati geologici, idrogeologici e geomorfologici e quindi grazie alla conoscenza del territorio in cui si opera. Nell'interpretazione dei dati PS occorre tenere presente una serie di elementi e limitazioni, legati principalmente alle caratteristiche intrinseche della tecnica e alla natura del dato. Per la definizione e caratterizzazione delle deformazioni registrate pertanto non è possibile fare riferimento esclusivamente al dato PS in quanto esso rappresenta solo uno tra gli elementi che, unitamente ai più tradizionali rilievi di terreno, fotointerpretazione, monitoraggio, dati storici, ecc., concorrono alla loro caratterizzazione. Il processo interpretativo prende il nome di "*radar interpretazione*", cruciale per poter analizzare criticamente il dato interferometrico senza intercorrere in valutazioni erranee.

Una corretta *radar interpretazione* passa attraverso il confronto, in ambiente GIS, tra i dati satellitari e i dati ancillari disponibili, quali:

- Ortofoto multi-temporali: la fotointerpretazione permette di valutare i cambiamenti nel tempo in una determinata zona. Questa analisi è utile ad esempio per correlare casi di subsidenza urbana con la recente costruzione di edifici e infrastrutture. A tal fine si consiglia l'utilizzo del servizio WMS del Geoscopio Regione Toscana dal quale si accede a molteplici risorse ortofotografiche, andando indietro nel tempo sino al 1954 (<http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/servizi/wms/OFC.htm>);
- Prodotti derivati dal modello digitale del terreno (DEM): prodotti derivati dal DEM quali la carta delle pendenze e dell'esposizione possono aiutare nel comprendere l'entità del movimento reale effettivamente misurabile da satellite;
- Cataloghi frane: confrontare la distribuzione spaziale dei PS con cataloghi preesistenti di frane è estremamente utile in fase di interpretazione. A tal fine devono essere utilizzate le mappature ufficiali a scala regionale (IFFI, PAI) e comunale;
- Misure di spostamento *in situ*: il confronto tra i dati da satellite ed eventuali misure *in situ* (misure inclinometriche, GPS, clinometriche, fessurimetriche, ecc..) è di sicuro supporto all'attività di interpretazione e validazione;
- Dati geologici/geomorfologici/idrogeologici a scala locale: qualsiasi tipo di dato di questo tipo a scala comunale/locale può essere utilizzato nel processo di interpretazione del dato interferometrico.

Si ricorda che è i dati interferometrici vanno, quando e ove possibile, verificati sul terreno attraverso un controllo di campagna per verificare, confermare o eventualmente migliorare le valutazioni effettuate sui fenomeni deformativi individuati da satellite.

Nel processo di interpretazione del dato interferometrico è necessario tenere sempre in considerazione il fatto che le misure vengono effettuate lungo la congiungente sensore-bersaglio, ovvero la linea di vista del satellite (LOS). Le misure di spostamento fornite dai dati PS sono perciò espressione solo di una componente del vettore reale dello spostamento. In particolare, quanto più il vettore di spostamento reale tende ad essere perpendicolare alla linea di vista del satellite tanto più il valore di spostamento misurato sarà sottostimato fino ad essere pressoché nullo nel caso di perpendicolarità tra le due direzioni.

La variabilità della componente di deformazione misurata da satellite è funzione dell'orientazione della direzione reale di deformazione (Figura 5). Lo schema A corrisponde ad una situazione ottimale nella quale la LOS (freccia blu) e la direzione reale del movimento (freccia rossa) sono quasi parallele. In questo caso è possibile misurare l'80% del movimento reale. Gli schemi B e C mostrano come all'aumento dell'angolo tra LOS e vettore spostamento reale, sino ad un massimo di 90°, la componente misurabile diminuisca. Lo schema B è riferito ad un movimento in allontanamento rispetto al sensore; in questo caso la misura da satellite equivale a solamente il 20% di quella reale. Lo schema C rappresenta un caso analogo con

movimento in avvicinamento rispetto al sensore. La sottostima del movimento reale è comune nel caso delle frane, soprattutto lungo versanti esposti a Nord o a Sud. Nel caso della subsidenza, caratterizzata da prevalente componente verticale, la sottostima è meno rilevante.

La semplice visualizzazione del dato utilizzando una scala colori per rappresentare i valori di velocità permette di avere indicazioni utili sul tipo di fenomeno che ha generato i movimenti del terreno registrati da satellite. In particolare:

- in zone pianeggianti, velocità aventi lo stesso segno in entrambe le orbite sono riferibili a movimenti di abbassamento (subsidenza per sovrasfruttamento della falda, processi di consolidazione) o innalzamento del terreno;
- in zone pianeggianti, velocità di segno opposto nelle due orbite, soprattutto se riferite a punti isolati non sono da considerare come effettivamente legate ad un movimento del terreno ma a problemi in fase di elaborazione del dato;
- in zone montane o collinari, velocità aventi segno opposto nelle due orbite sono molto probabilmente legate a movimenti di versante;
- in zone montane o collinari, velocità dello stesso segno in entrambe le orbite sono legate a frane solamente nel caso in cui la componente principale sia sub-verticale, riscontrabile solitamente nelle porzioni di corona di scivolamenti rotazionali o di frane complesse. Negli altri casi, i dati satellitari devono essere attentamente valutati, essendo potenzialmente legati a errori.

In Figura 9 è presentato un esempio di subsidenza monitorata da satellite. Le velocità hanno lo stesso segno (negativo) e la stessa entità in entrambe le orbite. Il segno è negativo poiché il movimento è in allontanamento rispetto al sensore.

In Figura 10 è riportato un esempio di frana identificata grazie ai dati satellitari interferometrici. Le velocità hanno segno opposto nelle due orbite. Considerando che la direzione principale del movimento della frana è verso Est, i dati in orbita discendente avranno segno positivo e quelli in orbita ascendente negativo. Ciò è dovuto all'osservazione dello stesso movimento da due punti di vista differenti, orientati in maniera opposta rispetto al versante.

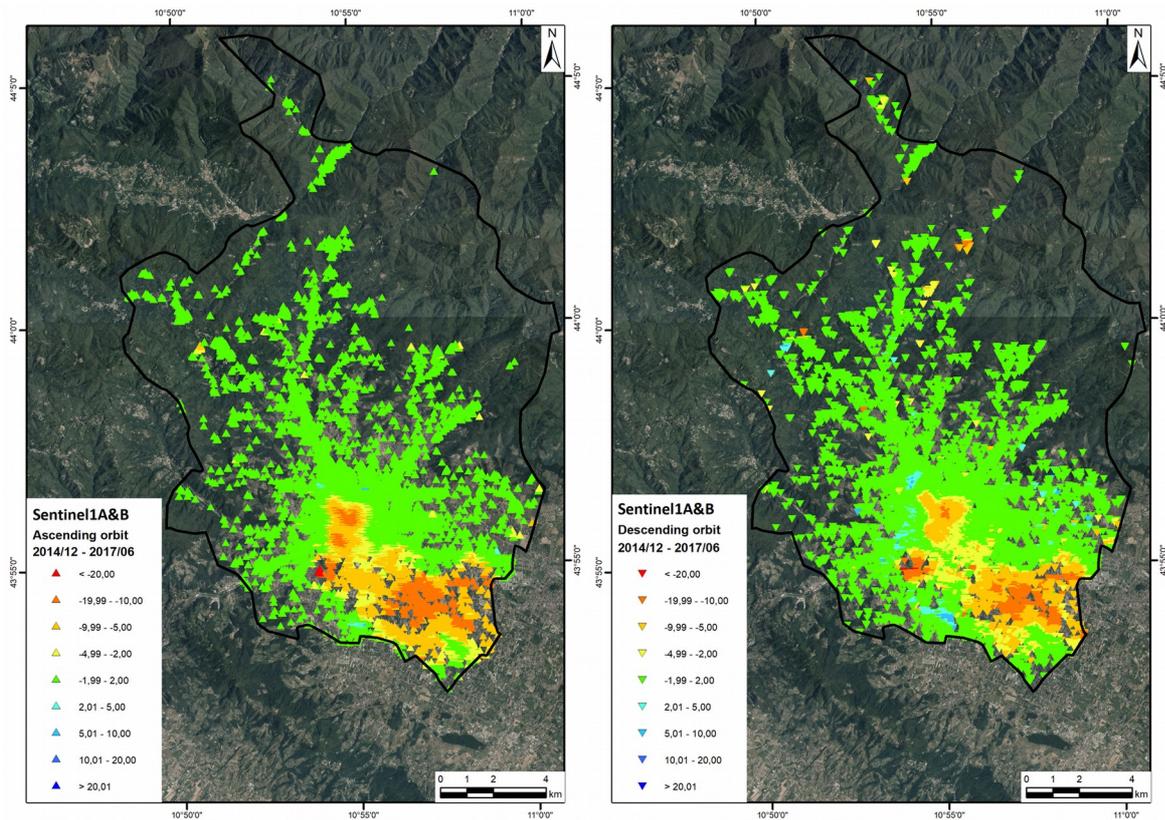


Figura 9 – Esempio di subsidenza. Le velocità in entrambe le orbite hanno lo stesso segno (negativo, movimento in allontanamento rispetto al sensore) e la stessa intensità.

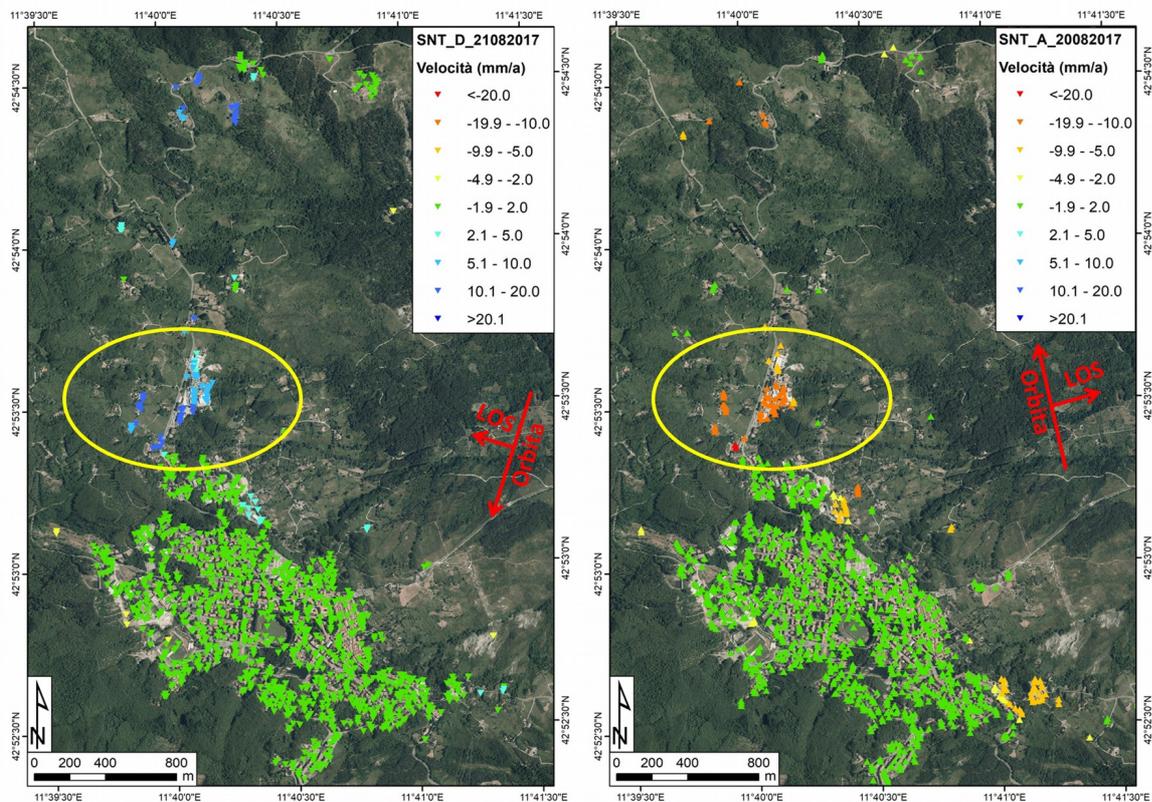


Figura 10 – Esempio di area in frana (elisse gialla). Le velocità hanno segno opposto nelle due orbite. Positivo in orbita discendente (a sinistra) e negativo in orbita ascendente (a destra). Il movimento della frana è verso Est.

6 Suggerimenti sull'utilizzo dei dati interferometrici

Questo capitolo del manuale d'uso ha lo scopo di illustrare alcuni suggerimenti utili per l'uso e l'interpretazione corretta dei dati interferometrici satellitari messi a disposizione nel geoportale Regione Toscana. Saranno inoltre illustrate alcune pratiche da evitare e i campi di non utilizzo di questi dati.

6.1 Campi di applicazione

Considerando la precisione delle misure e la copertura spaziale e temporale, i campi di applicazione primari dei dati interferometrici sono:

- Individuazione e mappatura delle aree in subsidenza: le aree urbane, frequentemente affette da subsidenza sia areale che locale, sono ambienti ideali per l'utilizzo dei dati interferometrici. Infatti, i lenti movimenti verticali legati all'abbassamento del suolo e l'alta densità di edifici e manufatti antropici rende la subsidenza in area urbana lo scenario migliore per un'analisi interferometrica;
- Individuazione e mappatura delle frane: questa attività è possibile soltanto nel caso in cui la frana oggetto di analisi presenti riflettori al suo interno. Inoltre, non tutte le tipologie di frana possono essere monitorate: solamente le frane a cinematica lenta (frane molto lente ed estremamente lente secondo la classificazione di Cruden & Varnes, 1996) possono essere efficacemente misurate. I movimenti veloci (o addirittura istantanei) legati a tipologie quali colamenti rapidi o crolli non possono essere in alcun modo individuati e misurati;
- Mappatura a larga scala di aree in deformazione: grazie all'elevata mole di informazioni fornite a scala regionale, i dati interferometrici sono ottimali per l'individuazione, su vasta scala, di aree in deformazione. Le mappe di deformazione, contenute nel geoportale, costituiscono una "fotografia" del territorio ad una determinata data, consentendo di individuare in maniera rapida le aree che presentano le deformazioni maggiori;
- Valutazione dell'andamento nel tempo delle deformazioni: le serie temporali, grafici che rappresentano lo spostamento registrato alla data di acquisizione, sono il prodotto ultimo e più avanzato dell'analisi interferometrica. Permettono di ripercorrere la storia deformativa di un punto misura indietro nel tempo (fino ad ottobre 2014 nel caso del geoportale).

6.2 Limiti della tecnica interferometrica

La tecnica multi-interferometrica ha delle limitazioni dovute sia alla fisica del segnale *radar* sia al tipo di elaborazione. Di seguito vengono elencati i principali:

- Assenza di misure in aree boscate, agricole, con copertura nevosa perenne o in aree umide: questa limitazione è dovuta al metodo con cui i punti PS vengono scelti. Infatti, il requisito necessario e imprescindibile per la definizione di un PS è che la superficie a cui esso si riferisce non cambi nel tempo. Per questo motivo le aree con vegetazione alta e quelle agricole, in generale le aree con variazioni stagionali, vengono scartate. Le zone con copertura nevosa perenne e in generale con presenza di bacini idrici sono escluse poiché il segnale *radar* viene da esse assorbito e non riflesso;
- Deformazioni prospettiche: la modalità di acquisizione, non perpendicolare al suolo ma secondo un angolo di vista θ , dà origine a deformazioni prospettiche nelle immagini utilizzate. Di conseguenza, l'orografia influisce molto sulla qualità delle misure e sulla possibilità di ottenere punti PS. Le aree non visibili al satellite a causa di deformazioni prospettiche legate alla topografia del terreno non contengono PS. Le zone montane e con alta energia del rilievo e i versanti esposti verso Nord e verso Sud risultano essere problematici dal punto di vista interferometrico. Si consiglia in questi casi di valutare attentamente le misure raccolte;

- Capacità di rilevare deformazioni lungo la direzione della LOS: le misure di spostamento fornite dai dati PS sono perciò una componente di deformazione del vettore reale dello spostamento; a seconda dell'orientazione dei versanti, gli spostamenti potranno essere prossimi allo spostamento totale o solo una minima frazione degli stessi. Il valore di velocità rilevato sarà tanto più vicino a quello reale quanto più il movimento del bersaglio si sposta lungo la direzione coincidente con la LOS. Nel caso di moto ortogonale alla linea di vista del satellite lo spostamento misurato è nullo. Un'analisi superficiale della distribuzione dei PS lungo un versante, a d esempio, può portare a definire settori a comportamento cinematico diverso dove, in realtà, tali settori differiscono unicamente per l'orientazione del versante rispetto alle orbite satellitari, elemento che si riflette in componenti diversi degli spostamenti reali lungo la LOS;
- Mancanza di informazioni di spostamento in direzione N-S: data la geometria di acquisizione e la traiettoria orbitale dei satelliti in orbita è possibile apprezzare solo deformazioni lungo la direzione di LOS (componenti E-W e verticale);
- Campi di velocità rilevabili: la tecnica PS è in grado di individuare deformazioni all'interno di un preciso campo di velocità (velocità della componente lungo LOS):
 - Limite superiore: una delle leggi base dell'interferometria definisce lo spostamento massimo misurabile tra due acquisizioni come pari a $\frac{1}{4}$ della lunghezza d'onda del segnale *radar*. Per il satellite Sentinel-1 questo limite è uguale a 1.4 cm tra due acquisizioni. La velocità massima misurabile è invece pari a 80 cm/anno. Questo valore permette la misura di movimenti connessi a fenomeni costanti nel tempo e a cinematica lenta, ma non consente né l'individuazione né la misura di movimenti a cinematica rapida o addirittura istantanei (come ad esempio colamenti veloci o collassi strutturali);
 - Limite inferiore: bersagli con velocità lungo LOS pari a ± 2 mm/anno rientrano all'interno dell'intervallo di sensibilità della tecnica interferometrica;
- Tempo di rivisitazione: i satelliti Sentinel-1 hanno un tempo di rivisitazione di 6 giorni. Questo limita l'utilizzo del dato interferometrico presente nel geoportale alla sola mappatura statica delle deformazioni aggiornata all'ultima acquisizione disponibile. In nessun caso il dato interferometrico presente nel geoportale può essere considerato come una misura in tempo reale dei movimenti del terreno. In nessun caso il dato interferometrico presente nel geoportale può essere utilizzato per scopi di allertamento o per la previsione delle deformazioni future;
- Movimenti non lineari: l'analisi PS contenuta nel geoportale presuppone l'esistenza di movimenti che seguono un andamento lineare. In presenza di spostamenti che non seguono il modello lineare si hanno forti perdite di coerenza che possono portare alla perdita del PS. In presenza di movimenti non lineari occorre pertanto modificare l'algoritmo utilizzato (per esempio applicando dei modelli polinomiali o una riduzione dei valori della soglia di coerenza). L'adozione di modelli diversi da quello lineare comporta tuttavia un notevole calcolo computazionale che rende possibile la loro applicazione solo nel caso di studi di dettaglio, limitati ad un'area circoscritta.

6.3 Pratiche da evitare

Considerando i limiti della tecnica multi-interferometrica e dei prodotti disponibili sul geoportale Regione Toscana, le seguenti pratiche sono da evitare:

- Valutare l'integrità strutturale di singoli edifici o infrastrutture: i dati interferometrici non sono uno strumento utile al fine di stimare la presenza di problemi strutturali in edifici ed infrastrutture ma servono per valutare gli effetti di movimenti del terreno sulle strutture;
- Utilizzo ed interpretazione di un singolo PS: si evidenzia che la presenza di un singolo punto isolato, per quanto caratterizzato da velocità media annua significativa (*i.e.*, $> +2$ mm/anno oppure < -2 mm/anno) non sempre è da ritenersi significativa e rappresentativa di un fenomeno deformativo

(frana, subsidenza, sollevamento), in quanto potrebbe essere, molto verosimilmente, legata a fenomeni di instabilità molto localizzati, a problematiche locali del manufatto che funge da riflettore oppure a errori intrinseci nel dato. Di conseguenza, soltanto gruppi di punti di misura consistenti e le cui velocità di deformazione nelle due orbite siano coerenti con un fenomeno deformativo in atto, sono da ritenersi sicuramente rappresentativi di un fenomeno deformativo;

- Utilizzo acritico del dato PS: la presenza di PS con velocità di deformazione non trascurabile non rappresenta in alcun modo la reale estensione del fenomeno che la induce, sia essa frana, subsidenza o sollevamento. La disponibilità del dato PS rappresenta solamente il supporto iniziale per ulteriori e più approfondite analisi, tra cui, appunto, la mappatura e la delimitazione del fenomeno deformativo, che deve avvenire necessariamente con l'ausilio di dati topografici, geologici e tematici;
- Monitoraggio di movimenti veloci o istantanei: date le caratteristiche intrinseche della metodologia non è possibile misurare movimenti al di fuori delle soglie imposte dalla fisica del segnale *radar*. Frane veloci e collassi strutturali non possono in alcun modo essere individuati e misurati;
- Misurare movimenti del terreno in aree boscate, agricole, con copertura nevosa perenne o in aree umide: sulle aree densamente vegetate o con copertura nevosa perenne il segnale *radar* viene assorbito e non riflesso, quindi non è possibile identificare bersagli PS;
- Interpretare il fenomeno deformativo sulla base delle sole velocità misurate: le misure interferometriche richiedono sempre di essere supportate da dati geologici, geomorfologici e idrogeologici per essere correttamente comprese. Non è possibile utilizzare i dati in maniera "cieca" senza una corretta comprensione del fenomeno che potrebbe aver generato il movimento;
- Interpretare l'assenza di punti PS come assenza di movimenti: l'assenza di punti misura su di un manufatto o in una determinata area non comporta l'assenza di movimento. I punti PS vengono selezionati sulla base di una procedura semi-automatica applicata a scala regionale e basata su soglie; non è quindi assicurato che ogni edificio della regione sia associabile ad un PS;
- Non verificare a terra le deformazioni misurate da satellite: si consiglia, per quanto possibile, di valutare a terra i possibili effetti delle deformazioni riscontrate. Non è sempre verificato che le deformazioni misurate corrispondano a danni sugli edifici ma è buona prassi valutare, attraverso sopralluoghi di verifica, lo stato dei luoghi. I dati interferometrici sono un valido supporto nella scelta delle aree in cui convogliare gli sforzi delle pubbliche amministrazioni ma non sostituiscono il lavoro da svolgere *in situ*. La disponibilità di dati di monitoraggio classici (GPS, inclinometri, fessurimetri, ecc...) è estremamente utile per la validazione del dato;
- Interpretare genericamente la componente di movimento misurata come verticale: le misure interferometriche sono fatte lungo la congiungente sensore-bersaglio; solamente nel caso della subsidenza questa misura è indice di movimenti prettamente verticali. Nel caso di frane la componente misurata deve essere considerata come lungo versante;
- Considerare la velocità rilevata da satellite uguale a quella misurabile sul terreno: a causa dell'effetto dell'esposizione dei versanti rispetto alla geometria di acquisizione, il dato da satellite molte volte sottostima il movimento reale. Ciò è evidente nel caso di frane con direzione di movimento principale verso Nord o Sud; nel caso della subsidenza la sottostima è molto ridotta.

7 Bibliografia di riferimento

Di seguito vengono riportati alcuni testi di riferimento sia in lingua italiana che in inglese che risultano utili per approfondire gli argomenti trattati in queste linee guida. Tutti gli articoli sono gratuiti e liberamente scaricabili.

- *“Linee guida per l’analisi di dati interferometrici satellitari in aree soggette a dissesti idrogeologici”*, redatte nell’ambito del progetto di copertura interferometrica nazionale “Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PST-A)”. Autori vari, dicembre 2009, link: <http://www.pcn.minambiente.it/GN/images/documenti/leggi/LINEE%20GUIDA%20PER%20ANALISI%20DI%20DATI.pdf>
- *“Nota sintetica per la comprensione del dato satellitare PSInSAR e Squeesar”*, progetto RiskNat-Alcotra. Autori vari, link: http://www.cartografiarl.regione.liguria.it/RiskNat/doc/NOTA%20SINTETICA_PSInSAR.pdf
- *“Analisi dei fenomeni di subsidenza nel bacino del fiume Arno mediante interferometria radar”*. Canuti et al., 2006, link: <https://www.aigaa.org/AIGA/public/GGA.2006-04.0-17.0145.pdf>
- *“Nuove tecnologie radar per il monitoraggio delle deformazioni superficiali del terreno: casi di studio in Sicilia”*. Casagli et al., 2009, link: https://www.researchgate.net/publication/233859531_Nuove_tecnologie_radar_per_il_monitoraggio_delle_deformazioni_superficiali_del_terreno_casi_d_i_studio_in_Sicilia
- *“Persistent scatterer interferometry”*. Crosetto et al., 2016, link: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271615002415>
- *“Permanent scatterers in SAR interferometry”*. Ferretti et al., 2001, link: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/898661/>
- *“A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR”*. Ferretti et al., 2011, link: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5765671/>
- *“Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research”*. Zhou et al., 2009, link: <https://www.mdpi.com/1424-8220/9/3/1876/htm>
- *“Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique”*. Colesanti et al., 2003, link: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795202001953>
- *“Landslide Types and Processes”*. Cruden & Varnes, 1996, pdf disponibile su [researchgate.net](https://www.researchgate.net)